

# 工业纯钛板材冷轧粘辊机理及影响因素探讨与研究

彭 艳<sup>1,2</sup>, 李文山<sup>1</sup>, 石宝东<sup>1</sup>, 陈国兴<sup>1</sup>

(1. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

(2. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 钛材广泛应用于航空航天等领域, 但由于其在冷轧过程中容易出现粘辊问题, 造成生产效率较低。针对该问题, 首先计算了 Ti、Al、Cu、Mg 与 Fe 的界面结合能及各金属内部结合能, Ti 与 Fe 界面粘着能大于各金属内部结合能, 而另 3 种金属则介于金属内部结合能之间, 因此当 Fe、Ti 表面紧密接触并发生相对运动时, 断裂将发生于 Ti 基体较深层处。然后分析了 TA2 冷轧工况下的粘辊情况, 为表征粘辊程度, 在建立冷轧粘着指数模型的基础上, 重点分析了压下规程、轧制速度、润滑剂种类等因素对粘辊程度的影响, 提出 TA2 冷轧速度应低于 3 m/s, 单道次压下率应低于 20% 等防粘工艺, 对于指导生产实践、治理粘辊具有现实意义。

**关键词:** 钛; 冷轧; 粘辊; 界面粘着能; 粘着指数

中图分类号: TG146.2<sup>3</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)08-2009-07

钛材具有比强度高、中温性能好和耐腐蚀等特点, 广泛应用于航空航天、海洋开发、石油化工、食品及医疗卫生等行业。然而钛材也存在一些缺点, 比如化学亲和性大, 易与摩擦表面产生粘附现象<sup>[1]</sup>。

在钛的各型材料中, 以板材应用最为广泛, 约占钛材总消耗量的 50% 以上。工业纯钛冷轧时容易出现粘辊现象, 严重影响了板材的表面质量和轧辊寿命, 国内外对粘辊机理的研究尚处于试验探索阶段<sup>[2-6]</sup>, 而对于粘辊的理论研究则鲜有资料可查。

轧辊的主要组成元素为 Fe, 工业纯钛板的主要组成元素为 Ti, 因此本研究首先从能量角度证明塑性变形中 Fe 与 Ti 紧密接触并发生粘着的必然性, 然后重点分析冷轧工况下, 轧辊与 TA2 板材变形区接触形貌特征以及变形区润滑膜破裂机理, 在此基础上建立冷轧粘着指数模型, 用以表征冷轧粘辊程度, 编程计算各种工况下、各道次的粘着指数, 分析各因素对冷轧粘辊的影响。

## 1 粘着的金属学本质

### 1.1 粘结点断裂形式

如图1界面粘结点断裂形式所示, 两物体紧密接触, 其中一物体相对另一物体发生切向位移, 接点附近将发生断裂, 断裂形式有以下几种情况<sup>[7]</sup>:

(1) 界面比滑动表面中任一金属都弱, 则剪切发

生在界面上, 并且粘着极小。

(2) 界面比滑动中的一金属强而比另一金属弱, 这时断裂发生在较软金属的表层上, 并且磨屑粘附到较硬金属表面上去。

(3) 界面比两金属都强, 这时断裂发生于一方或双方基体较深层处, 沿滑动方向发生强烈粘着。

上述情况中的(1)和(3)之间粘着量相差很大, 最高可达100倍<sup>[7]</sup>。

### 1.2 Ti-Fe界面断裂形式

要确定Ti-Fe界面的断裂通道, 首先应计算Ti-Fe界面的粘着能  $\Delta\gamma_{\text{Fe-Ti}}$  及两材料内部的结合能之间的大小关系。然后根据上节理论, 判定其断裂形式。

界面粘着能  $\Delta\gamma_{\text{Fe-Ti}}$  在数值上等于两金属表面从完全结合到逐渐拉开, 最后形成2个新表面过程外力所

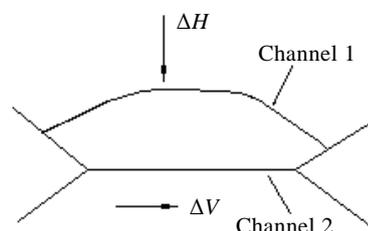


图 1 界面粘结点断裂形式

Fig.1 Break form of interfacial adhesion

收稿日期: 2015-08-09

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAF15B01); 国家自然科学基金 (51375424)

作者简介: 彭 艳, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004, 电话: 0335-8387651, E-mail: pengyan@ysu.edu.cn

做的功,因此可用于衡量两金属产生粘着的难易程度,两金属界面粘着能越大,越容易发生粘着<sup>[8]</sup>。

界面粘着能主要由两部分构成<sup>[9]</sup>:一是铁和钛的表面能  $\gamma_{Fe}^0$ 、 $\gamma_{Ti}^0$ ;二是界面能  $\gamma_{Fe-Ti}^0$ ,即

$$\Delta\gamma_{Fe-Ti} = -\gamma_{Fe}^0 - \gamma_{Ti}^0 + \gamma_{Fe-Ti}^0 \quad (1)$$

其中,界面能  $\gamma_{Fe-Ti}^0$  又由两部分构成,即

$$\gamma_{Fe-Ti}^0 = \gamma^c + \gamma^g \quad (2)$$

$\gamma^c$  是由界面上化学键错配而引起的,称为化学项。由于钛的化学性质活泼,且d键饱和度低,因此其化学项较其他大部分金属相比为高。化学项可以用金属Fe与Ti形成合金时的溶解热  $\Delta H_{Fe-Ti}^{sol}$  表示。

$\gamma^g$  是由界面位错产生的,称为几何项。铁与钛2种金属的晶体结构不同,在双金属接触界面上必定出现错排而导致位错形成,位错为界面集聚了能量,构成界面能的另一部分。几何项  $\gamma^g$  可以用金属Fe、Ti的表面能进行经验估计<sup>[10]</sup>。

$$\gamma^g = 0.15(\gamma_{Fe}^0 + \gamma_{Ti}^0) \quad (3)$$

因此

$$\Delta\gamma_{Fe-Ti} = -0.85(\gamma_{Fe}^0 + \gamma_{Ti}^0) + \alpha\Delta H_{Fe-Ti}^{sol} \quad (4)$$

铁、钛金属内部粘着能  $\Delta\gamma_{Fe-Fe}$ 、 $\Delta\gamma_{Ti-Ti}$ ,相当于金属内部大角度晶界能,由于材料内部大角度晶界处的结合主要由晶界位错引起,因此忽略化学键错配影响<sup>[11]</sup>,即

$$\Delta\gamma_{Fe-Fe} = -1.7\gamma_{Fe}^0 \quad (5)$$

$$\Delta\gamma_{Ti-Ti} = -1.7\gamma_{Ti}^0 \quad (6)$$

钛的相关参数如下<sup>[11]</sup>(单位J/m<sup>2</sup>):  $\gamma_{Fe}^0 = 2.55$ ,

$\gamma_{Ti}^0 = 2.05$ ,  $\gamma_{Fe-Ti}^c = -0.45$ 。得出:  $\Delta\gamma_{Fe-Fe} = -4.335$ ,

$\Delta\gamma_{Ti-Ti} = -3.485$ ,  $\Delta\gamma_{Fe-Ti} = -4.36$ 。

用同样的方法可分别计算出铝、铜、镁(用M表示)的界面粘着能与内部结合能,按照计算数据做出图表,如图2所示。图中M-M表示对应材料内部结合能,用白色柱形表示;Fe-Fe为铁内部结合能,用灰色柱形表示;M-Fe为各材料与铁的界面结合能,用剖面线柱形表示。

图2是金属界面粘着能与内部结合能的关系。由图可知,铝、铜、镁3种金属与铁的界面粘着能介于两金属内部结合能之间,因此断裂形式为文章1.1节的第2种形式,仅发生轻微粘着;而铁与钛的粘着能大于任一材料内部结合能,两金属界面紧密接触并发生相互运动时,将发生强烈粘着。这是钛比其他金属容易粘着的金属学原因。

## 2 冷轧变形区粘辊机理

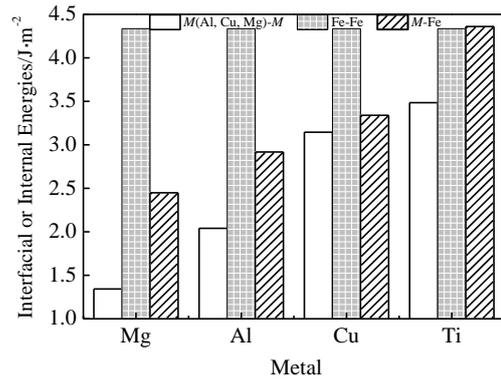


图 2 金属界面粘着能与内部结合能的关系

Fig.2 Relationship between interfacial adhesion energy and internal binding energy of different metals

### 2.1 冷轧变形区粘着指数的提出

宏观上,由于采取润滑措施,轧辊与板材变形区由一层润滑油膜隔离,如图3所示。轧辊与板材之间只有在局部润滑油膜破裂区域才发生粘着,如图4所示。因此,实际粘着强度要比理论计算值小得多。

文献[12]在阐述粘辊问题时指出,随着接触界面温度的升高,粘着力急剧上升,实验表明,当轧辊表面温度高于180℃时,极易发生轧痕或粘辊现象,此温度与对应润滑油膜的破裂临界温度基本一致。

另外,文献[12]还给出适用于各种润滑油膜失效的临界温度计算公式:

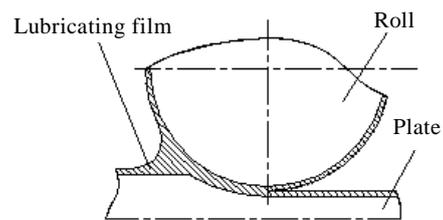


图 3 冷轧变形区的润滑

Fig.3 Lubricating of cold rolling deformation zone

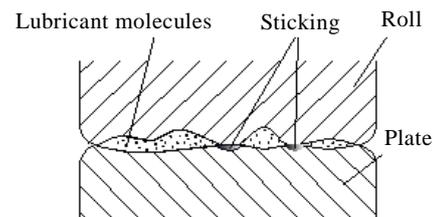


图 4 润滑油膜的破裂与接触区粘附

Fig.4 Rupture of lubricant film and contact adhesion

$$T_r = \frac{3\left(\frac{E_a}{RT_r} - 2\right) - \left[5\left(\frac{E_a}{RT_r}\right)^2 - 12\left(\frac{E_a}{RT_r}\right) + 12\right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{6.16}{V_s} \left(\frac{T_m}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_a}{RT_r}\right) \exp\left(-\frac{E_a}{RT_r}\right)} \quad (7)$$

式中,  $E_a$ 为吸附能,即解附热,是润滑油的基本性质; $R$ 为气体常数,取8.314, $M$ 为分子摩尔克数; $T_m$ 为润滑油熔点,这里取50℃; $V_s$ 为轧辊与板材变形区相对运动速度。

为计算方便,把润滑膜破裂部分百分比 $m_c=0.001$ 作为失效标准,得到润滑膜失效临界温度表达式<sup>[12]</sup>:

$$T_r = \frac{E_a}{R} \left\{ \ln \left[ 3.08 \times 10^4 \left(\frac{T_m}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \right] - \ln V_s + 6.907 \right\} \quad (8)$$

其中的相对运动速度 $V_s$ 采用Gelujiefu平均滑动速度简化公式计算<sup>[13]</sup>:

$$V_s = \frac{V\Delta h}{3h_1} \quad (9)$$

式中, $V$ 、 $\Delta h$ 、 $h_1$ 分别表示轧辊圆周速度、压下量、轧件出口厚度。

当辊缝局部最高温度超过临界温度 $T_r$ 时,发生显著粘辊现象。为求出辊缝局部最高温度,引入布洛克滑动界面最高温度模型<sup>[14]</sup>

$$T_{max} = A \frac{q_{av}}{(kpc)^{1/2}} \frac{w^{1/2}}{v^{1/2}} \quad (10)$$

式中, $A$ 为形状系数,取决于热通量在宽度上的分布形式; $q_{av}$ 为热通量分布平均值; $k$ 、 $p$ 、 $c$ 分别为轧件的导热率、密度、比热容; $w$ 为热源宽度; $v$ 为热源速度(相对于另一表面)。

为将布洛克公式应用于轧辊与带钢之间的界面最高温度的计算,做如下近似假设:(1)认为热源速度 $v$ 等于轧辊与板材平均滑动速度 $V_s$ ;(2)认为热源宽度 $w$ 为变形区接触弧长 $L$ 。

根据文献[15],热通量平均分布值 $q_{av}$ 可由下式确定

$$q_{av} = mfV\varepsilon/4JL \quad (11)$$

式中, $\varepsilon$ 为压下率,以小数形式表示; $J$ 为热机械当量,在采用国际单位制时 $J$ 取4.184; $m$ 为与摩擦系数 $\mu$ 有关的系数, $m=n\mu$ ,综合考虑系数 $m$ 的取值范围及冷轧摩擦系数 $\mu$ 的一般变化规律,取 $n=7$ ; $f$ 为单位宽度轧制力,根据Bland - Ford - Hill压力公式进行计算<sup>[16]</sup>:

$$f = L\sigma Q_p n_t \quad (12)$$

$$Q_p = 1.08 + 1.79\varepsilon\mu\sqrt{r/h_0} - 1.02\varepsilon \quad (13)$$

式中, $\sigma$ 为材料冷轧变形抗力,一般认为只与变形程

度有关; $n_t$ 为张力因子,取为1; $Q_p$ 为考虑接触表面摩擦力影响的应力状态系数; $r$ 为轧辊半径; $h_0$ 为轧件入口厚度。

这里用接触弧弦长作为变形区长度 $L^{[17]}$ :

$$L = \sqrt{r\Delta h} \quad (14)$$

将这些中间参数代入(10)式,则辊缝最高温度可由各轧制参数确定。

需要说明的是,对于上式中的摩擦系数 $\mu$ ,经典轧制理论并未考虑材料因素的影响,如下式:

$$\mu = \frac{K(1+0.5R_z)}{1+0.25\sqrt{\xi_{50}} - 0.005\xi_{50}} \times \left[ 0.07 - \frac{0.1V^2}{2(1+V)+3V^2} \right] \quad (15)$$

式中, $R_z$ 为轧辊表面不平度的平均高度; $\xi_{50}$ 为润滑油在50℃时的运动粘度; $K$ 为考虑润滑剂种类的系数。

实际上,轧件材料不同,摩擦系数是不同的。本文在考虑材料种类与压下率 $\varepsilon$ 对摩擦系数影响的基础上,建立摩擦系数修正模型。

$$\mu = \frac{K[1+(0.4+\varepsilon)R_z]}{1+0.25\sqrt{\xi_{50}} - 0.005\xi_{50}} \times \left[ 0.05 + \frac{C_1}{H} \Delta\gamma_{A-B} - \frac{0.1V^2}{2(1+V)+3V^2} \right] \quad (16)$$

式中 $C_1$ 为表面系数, $H$ 为板材硬度, $\Delta\gamma_{A-B}$ 为界面粘着能。

将公式(10)与(8)对比,可得粘着指数 $\lambda$ ,用于表征板材冷轧粘辊程度。

$$\lambda = f(E_a, M, T_m, \xi_{50}, V, \varepsilon, k, p, c, H, h_1, r, R_z, \Delta\gamma_{A-B}) \quad (17)$$

当 $\lambda < 1$ 时,粘辊程度轻微,认为未发生粘辊; $\lambda > 1$ 时,认为发生粘辊,且 $\lambda$ 值越大,则粘辊越严重; $\lambda = 1$ 为临界状态。

## 2.2 计算机模拟软件开发

为实现冷轧粘着指数计算的快捷化与可视化,方便下文对粘着指数进行数值分析,这里采用VB软件进行编程,仿真软件的开发,为工业在线应用奠定了良好基础。

计算机仿真软件参数输入界面及计算结果界面如图5,6。软件可用以计算不同金属、不同工艺、各道次的粘着指数数值,并绘制曲线图,待下文数值分析。

## 3 粘辊影响因素研究

由式(17)可知,粘着指数 $\lambda$ 与板材性质、轧辊尺寸及表面粗糙度、界面粘着能、轧制工艺、润滑油性能等诸多因素相关。由于篇幅限制,仅对压下规程、板材的热物性和力学性能、轧制速度、润滑油部分性能进行探讨。

### 3.1 压下规程对粘辊的影响

Reduction rules				The properties of material		The properties of lubrication	
Passes	$h_0$ (mm)	$h_1$ (mm)	Reduction ratio	Thermal conductivity (W/m·K)	Adsorption energy (KJ/mol)	Roller grain (μm)	
1	3.3	2.927	0.113	19	50		
2	2.927	2.500	0.146			250	
3	2.500	2.115	0.154	4537		50	
4	2.115	1.769	0.168				
5	1.769	1.469	0.165				
6	1.469	1.241	0.155				
7	1.241	1.063	0.144				
8	1.063	0.927	0.128				
9	0	0	0				
10	0	0	0				

图5 参数输入界面

Fig.5 Interface of parameter input

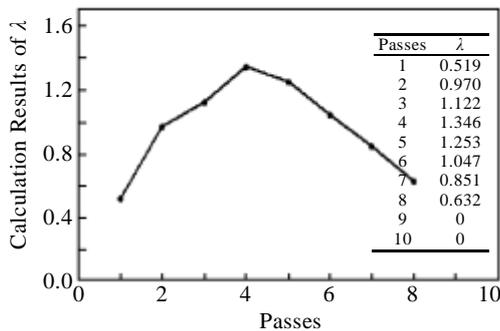


图6 计算结果界面

Fig.6 Interface of the results

为定量研究压下规程对工业纯钛冷轧粘辊的影响，对国外某知名企业TA2压下规程进行分析<sup>[18]</sup>。

国外某企业压下规程命名为压下规程1。在保持总压下量不变的前提下，改变各道次压下率，可得压下规程2。具体数据见表1，其中括号外数据为压下规程1，括号内数据为压下规程2， $h_0$ 为入口厚度， $h_1$ 为出口厚度。

取轧制速度  $V = 2 \text{ m/s}$ ，吸附能  $E_a = 50 \text{ kJ/mol}$ ，计算两压下规程各机架对应的  $\lambda$  值，如图7。

可以看出，即使在保持总压下量不变的前提下，不同的压下规程所对应的各个道次的  $\lambda$  分布是不同的，相应的最大  $\lambda$  值也不同。可见，可以通过优化压下规程来降低粘辊倾向。压下规程的优化既能满足轧制工艺要求，又不影响生产效率，可以作为冷轧过程防粘的主要措施。

表 1 TA2压下规程

Table 1 TA2 rolling schedule

Passes	$h_0$ /mm	$h_1$ /mm	$\epsilon$
1	3.300 (3.300)	2.928 (2.878)	0.113 (0.128)
2	2.928 (2.878)	2.502 (2.472)	0.146 (0.141)
3	2.502 (2.472)	2.140 (2.126)	0.145 (0.140)
4	2.140 (2.126)	1.835 (1.830)	0.143 (0.139)

5 1.835 (1.830) 1.577 (1.577) 0.141 (0.138)

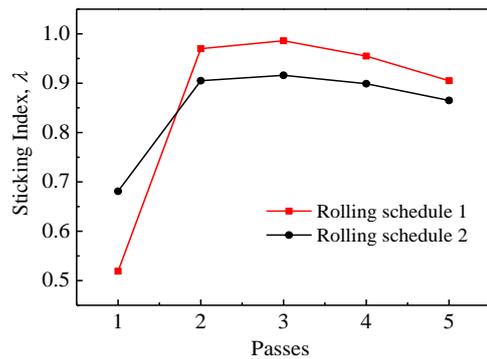


图 7 压下规程与粘着指数的关系

Fig.7 Relation between rolling schedule and sticking index

### 3.2 材料性质对粘辊的影响

模拟软件的计算程序中考虑了材料的导热系数、比热容、密度等参数，嵌入了如式(17)形式的冷变形抗力经验公式，因此可对各种金属的粘着指数进行计算。

$$\sigma = a + b\epsilon^c \quad (18)$$

其中， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 均为基于实验的参数，具体数值见文献[17]、[19]。本实验仅选择45#钢这样一种应用比较广泛的钢材与TA2做对比研究，两材料热物理性质见表2。

选用压下规程1，取轧制速度  $V = 3 \text{ m/s}$ ，润滑油分子吸附能  $E_a = 60 \text{ kJ/mol}$ ，根据2.1节计算思路，运用2.2节计算程序可方便计算出相同工艺下两材料对应的  $\lambda$  值，对比分析计算结果。

从图8可知，对于确定的冷轧工艺，由于钛的密度仅为普通钢材的1/2，单位体积工业纯钛的热容量低，温度变化显著。此外，钛的导热率也低，金属塑性变形过程中产生的界面摩擦热、变形热不能及时疏散，造成TA2的粘着指数较高。

### 3.3 润滑油性能对粘辊的影响

润滑剂分子与板材表面物理吸附与化学吸附的理论分界点为42 kJ/mol，因此这里取40，60 kJ/mol，分别代表普通润滑油和含卤族元素润滑剂分子吸附情况。取压下规程1，轧制速度  $V = 2.5 \text{ m/s}$ 。

若所选润滑油分子与板材表面仅发生物理吸附，则2~5道次粘着指数明显高于1，此时不能忽略粘辊对

表 2 TA2工业纯钛与45#钢热物理性质

Table 2 Thermo-physical properties of TA2 and 45# steel

Metals	Thermal conductivity/W (m K) <sup>-1</sup>	Density /kg m <sup>-3</sup>	Specific heat capacity/J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
TA2	19	4537	503

45# steel	48	7824	472
-----------	----	------	-----

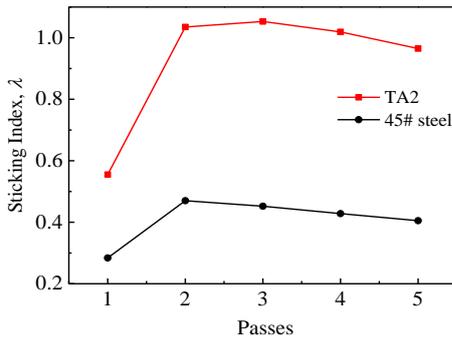


图 8 材料种类与粘着指数的关系

Fig.8 Relation between material type and sticking index

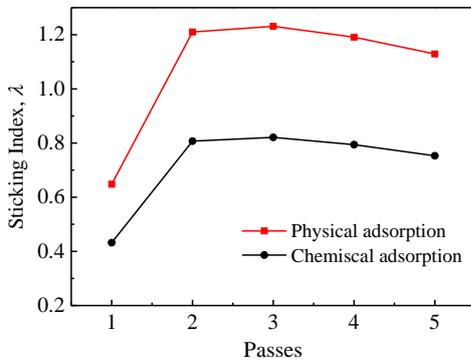


图 9 润滑油种类与粘着指数的关系

Fig.9 Relation between lubricant type and sticking index

板面、辊面造成的不良影响。普通润滑油分子对钛板表面的吸附能力弱，润滑膜破裂临界温度较低。因此要实现润滑膜不破裂，从而完全防止粘着并不现实。一般而言，钛材是在允许产生微量粘着的条件下进行轧制<sup>[20]</sup>。

### 3.4 轧制速度与压下率对粘辊的影响

不考虑润滑油性能的影响，将吸附能  $E_a$  取为物理吸附与化学吸附中间值 50 kJ/mol，定量模拟出轧制速度与冷轧机各机架粘着指数的关系。

由图10可以看出，速度越大，粘辊越严重。这是由于轧制速度的升高促进了变形区温升，而温度过高不利于润滑膜的完整性。当轧制速度高于 3 m/s 时，出现粘着指数大于 1 的情况。

利用文章计算模型及所开发的计算软件，可计算轧制速度分别为 2, 3 m/s 时第一机架粘着指数，即图6中道次1处所对应的  $\lambda$  值。改变该道次压下率  $\epsilon$ ，提取不同压下条件下的  $\lambda$  数据，用Origin绘图，得到图11。

由图11可知，在轧制速度一定的情况下，随着压下率的增加，单道次粘着指数线性递增。当压下率为 20% 时，粘着指数均超过 1，此时不可忽略粘辊对板材及轧辊表面质量的影响。因此，冷轧 TA2 工业纯钛时，轧制速度应低于 3 m/s，道次压下率应低于 20%。

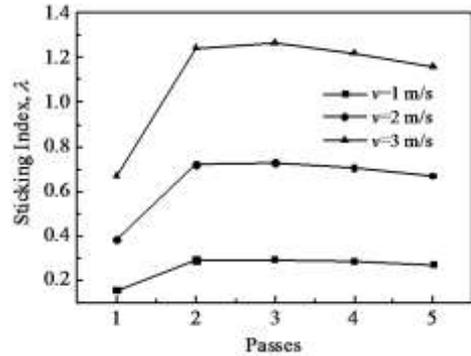


图 10 轧制速度与粘着指数的关系

Fig.10 Relation between rolling speed and sticking index

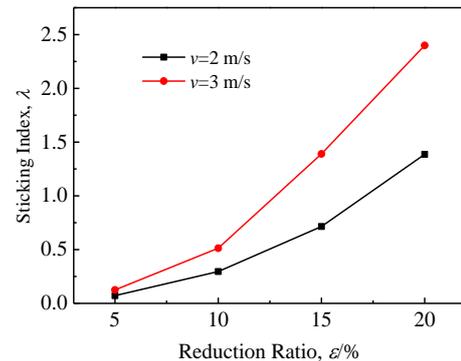


图 11 压下率与粘着指数的关系

Fig.11 Relation between reduction ratio and sticking index

### 3.5 试验验证

文献[19]参照国外轧制纯钛的经验，在甘辊轧机上进行了2卷纯钛GR1卷的试轧并对防粘工艺进行了讨论。试验结果显示，不宜采用高压下量、高速轧制，因为这将造成辊缝温度过高，导致粘辊现象的发生，如图12。

通过观察和经验并分析实验结果可知，为尽量避免粘辊现象，道次变形率不得超过 15%，轧制速度不高于 2.5 m/s。此结果与上文理论分析结果基本吻合。

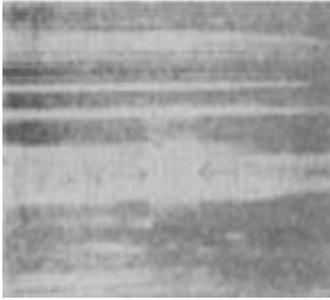


图 12 冷轧钛时产生粘附的轧辊表面情况

Fig.12 Surface condition of the rolls sticking produced during cold rolling of pure titanium

## 4 结 论

1) Ti-Fe界面粘着能大于任一金属内部结合能,当直接接触的两金属表面相对运动时,断裂将产生于钛材内部,并粘附于轧辊表面。

2) 钛导热率低、热熔低,冷轧TA2工业纯钛时,润滑膜较其他金属更容易破裂,导致轧辊与板材发生局部直接接触,造成粘着。

3) 在建立冷轧粘着指数模型的基础上,编程计算并分析各种因素对TA2冷轧粘辊的影响。指出TA2冷轧速度应低于3 m/s,单道次压下率应低于20%等防粘工艺。

### 参考文献 References

- [1] Li Mingli(李明利), Shu Ying(舒滢), Feng Yijiang(冯毅江) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2011, 28(6): 14
- [2] Cheng Tingyu(程挺宇), Zheng Feng(郑锋). *Shanghai Nonferrous Metals*(上海有色金属)[J], 2009, 30(4): 187
- [3] Liu Junxian(刘均贤), Han Jingtiao(韩静涛), Zhang Yongjun(张永军). *The Second Rolling Lubrication Technology Symposium*(第二届轧制润滑技术学术研讨会)[C]. Beijing: Youth Committee China Metal Institute, 2009: 13
- [4] Zhang Chi(张驰), Wang Xiaonan(王晓南), Liu Zhenyu(刘振宇) *et al.* *Journal of Northeastern University*(东北大学学报)[J], 2012, 33(2): 195
- [5] Takahiro Toriumi(鳥海貴大), Akira Shodoshima(小豆島明). *Iron and Steel*(鉄と鋼)[J], 2011, 97(7): 388
- [6] Dae Jin Ha, Hyo Kyung Sung, Sunghak Lee *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2009, A (507): 66
- [7] Shao Hesheng(邵荷生), Qu Jingxin(曲敬信) *et al.* *Friction and Wear*(摩擦与磨损)[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992: 164
- [8] Yao Ruohao(姚若浩). *Friction and Lubrication in the Processing of Metal Pressure*(金属压力加工中的摩擦与润滑)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 15
- [9] Li Jianming(李建明). *Wear of Metal Science*(摩擦金属学)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 65
- [10] Murr L E. *Addison-Wesley*[J], 1975, 95: 376
- [11] Gerkema J, Miedma A R. *Surface Science*[J], 1983, 124: 352
- [12] Sun Jianlin(孙建林). *Rolling Process Lubrication Principle Technology and Application*(轧制工艺润滑原理技术与应用)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 8
- [13] Gelujiefu, Geely Berg, Rick Ji. *Metal Pressure Processing of Friction and Lubrication Manual*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990: 53
- [14] Blok H. *Wear*[J], 1963, 6: 483
- [15] Roberts W L. *Cold-rolled Strip Steel Production*(冷轧带钢生产)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 324
- [16] Ren Yong(任勇), Cheng Xiaoru(程晓茹). *The Mathematical Model of Rolling Process*(轧制过程数学模型)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 82
- [17] Cao Hongde(曹鸿德). *Rolling Plastic Deformation Mechanics and Principles*(塑性变形力学基础与轧制原理)[M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 152
- [18] Liu Yi(刘毅). *Shanxi Metallurgy*(山西冶金)[J], 2013, 143: 5
- [19] "Nonferrous Metals and Heat Treatment" Writing Group(有色金属及其热处理编写组). *Nonferrous Metals and Heat Treatment*(有色金属及其热处理)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 190
- [20] Muraoka(村冈), Kazuo(一雄), Lv Yingceng(吕应曾). *Nonferrous Metals Processing*(有色金属加工)[J], 1996, 6: 33

## Sticking Mechanism and Influence Factors during Cold Rolling in Industrial Pure Titanium Plate

Peng Yan<sup>1,2</sup>, Li Wenshan<sup>1</sup>, Shi Baodong<sup>1</sup>, Chen Guoxing<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Titanium has been widely used in aerospace and other fields. But one of the key factors of low processing efficiency is the sticking problem between titanium plate and the roll surface during the process of cold rolling. Focusing on this problem, we calculated the interfacial adhesion energies between Ti, Al, Cu, Mg and Fe and their internal binding energies. Results show that the interfacial adhesion energy between Ti and Fe is greater than the internal binding energy of Ti and Fe, which is different from the other three metals. Therefore, fracture will occur on the deeper layer of titanium plate substrate with close contact and relative movement between Fe and Ti surfaces. Then, the sticking situation of TA2 during the cold-rolling process was analyzed. The lubricating film is easier to rupture than other metals due to titanium's unique properties, which results in direct contact and sticking between roller and titanium plate. Consequently, the sticking index is proposed to characterize the degree of sticking. The influence of draft rolling schedule, rolling speed and lubricant type on the degree of sticking was analyzed. We conclude that the cold-rolling speed of TA2 should be lower than 3 m/s, and the reduction rate of each pass less than 20%, which is important to guide the productive practice and to prevent sticking.

**Key words:** titanium; cold rolling; sticking; interfacial adhesion energy; sticking index

---

Corresponding author: Li Wenshan, Candidate for Master, National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P. R. China, Tel: 0086-335-8387651, E-mail: liwenshanvip@163.com